



# **Parameterabhängigkeiten bei Topologieoptimierungsalgorithmen und die Auswirkung auf den Konstruktionsprozess**

**15. Bayreuther 3D-Konstrukteurstag**

**18. September 2013**

**Stefan Hautsch, M.Sc.**



- Theoretischer und mathematischer Hintergrund der Optimierung
- Einführung in die Topologieoptimierungsalgorithmen von TOSCA Structure
- **Analyse der Parameterabhängigkeiten**
  - FE-Netzfeinheit
  - FE-Elementtyp
  - Interpolationsmethode / Penalty-Faktoren / Filter-Radius
  - Fertigungsrandbedingungen
  - Iterationsanzahl / Abbruchkriterium
  - Glättungsalgorithmus
- **Zusammenfassung und Ausblick**



- Simulationsmodell = **Finite-Elemente-Analyse** → berechnet Systemantworten
- Startentwurf / Modell = **Bauraum mit Lasten/Randbedingungen**
- **Parameter** = Restriktionen und spezifische Einstellungen des Optimierungsalgorithmus
- **Designvariablen** = normierte E-Moduli bzw. Elementdichten
- **Modifikation der Designvariablen**, d.h. Änderung der Geometrie des Bauteils durch Beeinflussung der Elementdichte bzw. des E-Moduls
- Iterative Berechnung der jeweils aktualisierten Geometrie, bis das Optimum oder Abbruchkriterium erreicht ist



- **Optimalitätskriterienverfahren** (OC – Optimality Criteria): intuitive bzw. auf Erfahrungen basierende Verfahren
  - Kein „mathematisches“ Verfahren, sondern aus Naturbeobachtungen entstanden
  - z.B. Fully Stressed Design (FSD) = voll beanspruchtes Tragwerk
  - Oder auf Basis der adaptiven biologischen Wachstumsregel (Bionik): das **SKO-Verfahren** (Soft Kill Option), welches Material an Stellen mit geringer Spannung eliminiert
- **MMA-Verfahren**: Methode der bewegten Asymptoten (Method of Moving Asymptotes)
  - Lösung über die Lagrange-Formulierung des Optimierungsproblems, z.B. mit der dualen Methode; hierzu ist eine Approximation nötig!
  - Approximation der Ziel-/Restriktionsfunktion über das allgemein formulierte MMA-Verfahren (dies erlaubt alle Zwischenstufen zwischen linearer und reziproker Approx.)



- Für Topologieoptimierung: Zusammenhang zwischen Dichte und E-Modul gesucht → nur Dichte 0 und 1 sind relevant (Loch/Vollmaterial)!

- **SIMP-Ansatz** (Solid Isotropic Material with Penalization)

→ Penalty-Faktor bestraft mittlere Dichten,  
in der Praxis:  $2 \leq p \leq 4$

$$\frac{E_i}{E_i^0} = \left( \frac{\rho_i}{\rho_i^0} \right)^p$$

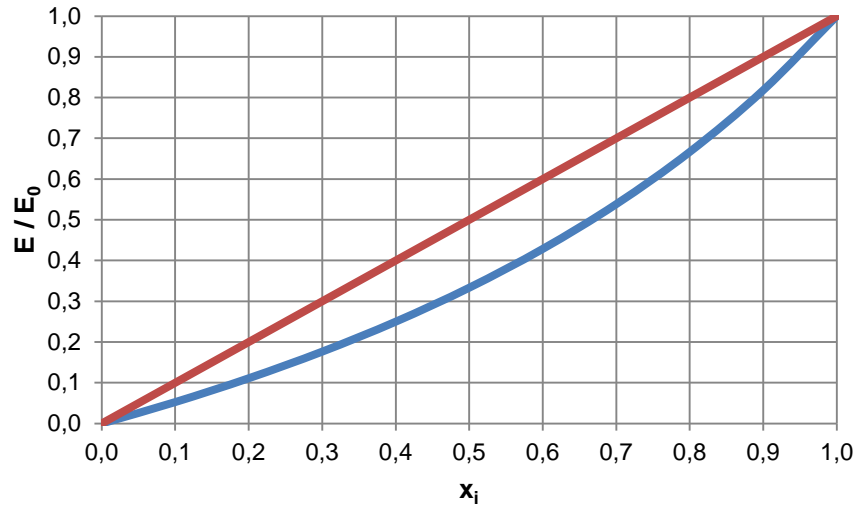
- **RAMP-Ansatz** (Rational Approximation of Material Properties)

→ Verlauf entspricht dem Hashin-Shtrikman-Materialverhalten (bei passender Wahl von  $p$ )

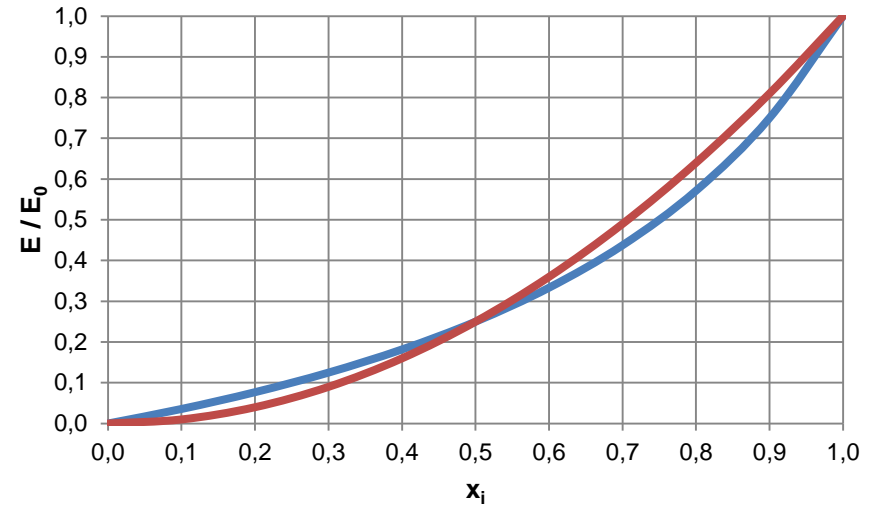
$$\frac{E_i}{E_i^0} = \frac{\left( \frac{\rho_i}{\rho_i^0} \right)}{1 + p \cdot \left( 1 - \frac{\rho_i}{\rho_i^0} \right)}$$



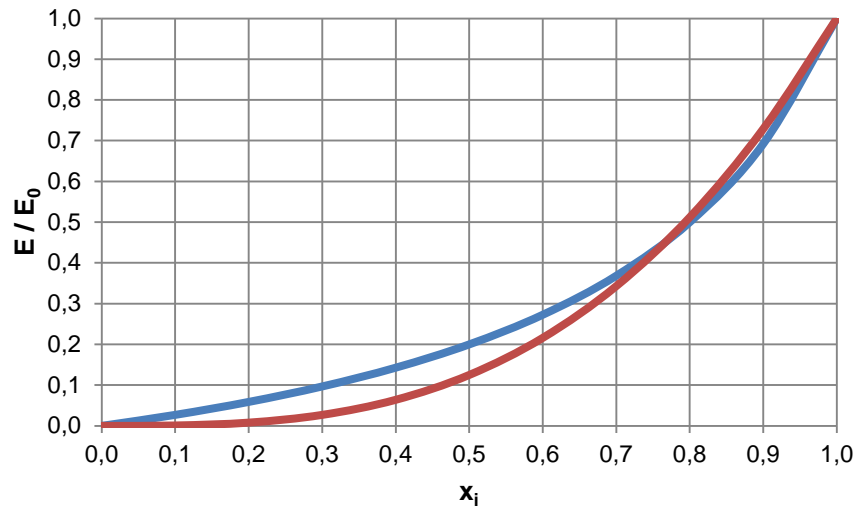
theor. Verlauf von SIMP und RAMP - Penalty-Faktor 1,0



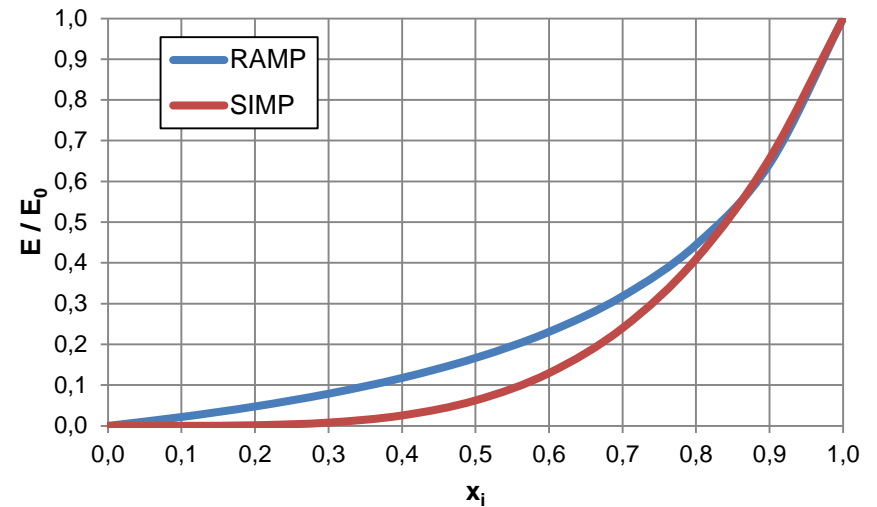
theor. Verlauf von SIMP und RAMP - Penalty-Faktor 2,0



theor. Verlauf von SIMP und RAMP - Penalty-Faktor 3,0

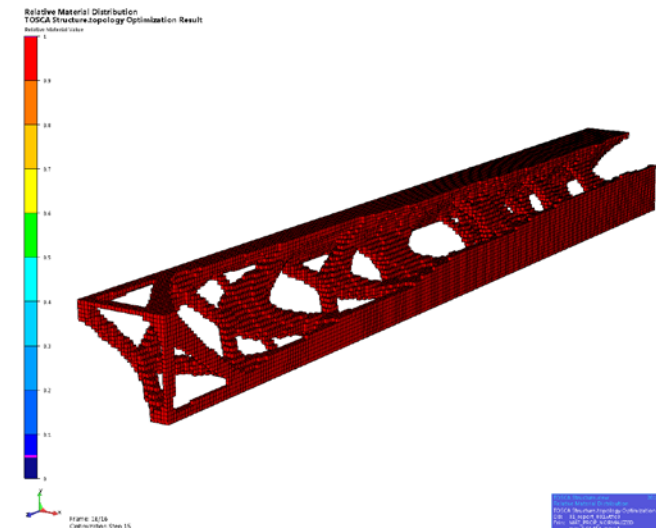


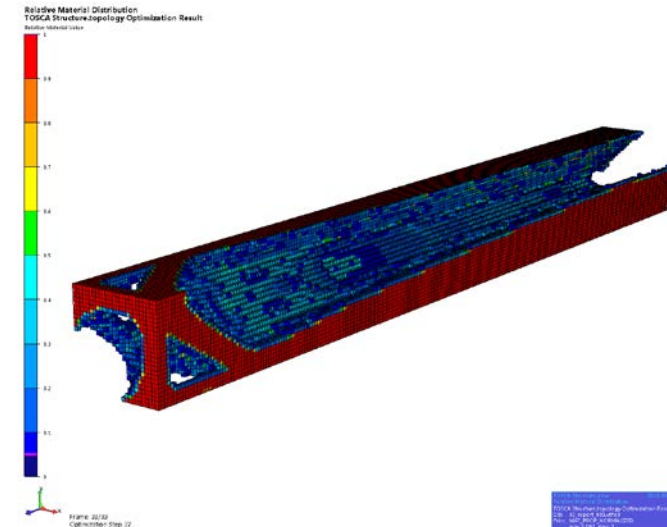
theor. Verlauf von SIMP und RAMP - Penalty-Faktor 4,0





- Der Controller-Algorithmus verfährt *wahrscheinlich* nach dem Prinzip der **Optimalitätskriterien**, z.B. dem SKO-Verfahren
- Zielfunktion: **minimale Nachgiebigkeit**
- Benötigt Knotenspannungen und Dehnungsenergie aus der FEA (keine Sensitivitäten nötig!)
- Beginnt mit Vollmaterial, d.h. relative Dichte 1,0
- Feste Anzahl Iterationen (Standard 15)
- Schnelle Konvergenz, 0-1-Struktur als Ergebnis

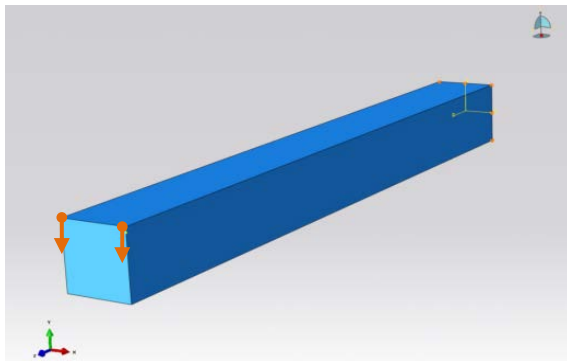




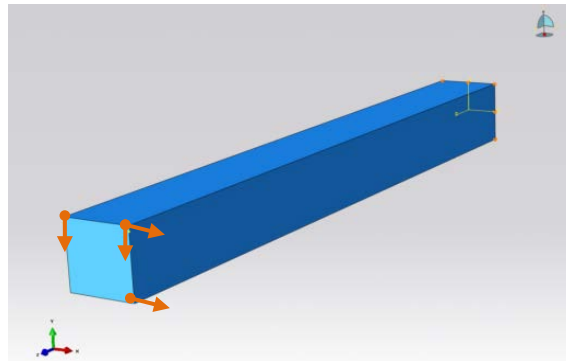




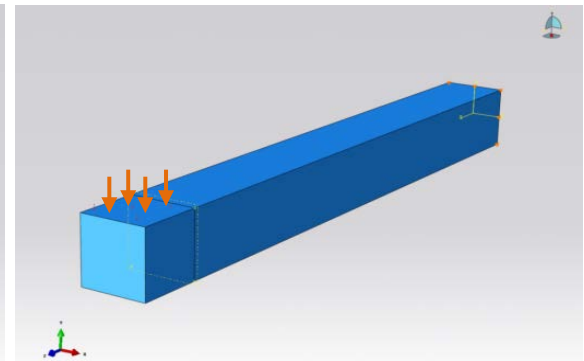
- Analyse der Algorithmen aus **TOSCA Structure V.7.1.1** (FE-Design)
- Externer FE-Solver: **Abaqus/CAE v.6.11-2**
- Preprocessing in ABAQUS → Export als INP-Datei (*solver deck*)
- Bauteil: Kragbalken ( $2000 \times 200 \times 200 \text{ mm}^3$ ) mit 3 Lastfällen (vgl. Abbildungen), Kräfte je 1000 N, Drucklast 1000 MPa auf  $200 \times 200 \text{ mm}^2$
- Linear statische Rechnung; Stahl mit  $E = 206.000 \text{ N/mm}^2$  und  $\nu = 0,3$
- Zielfunktion: minimale Nachgiebigkeit; Volumenrestriktion 30%



Lastfall 1



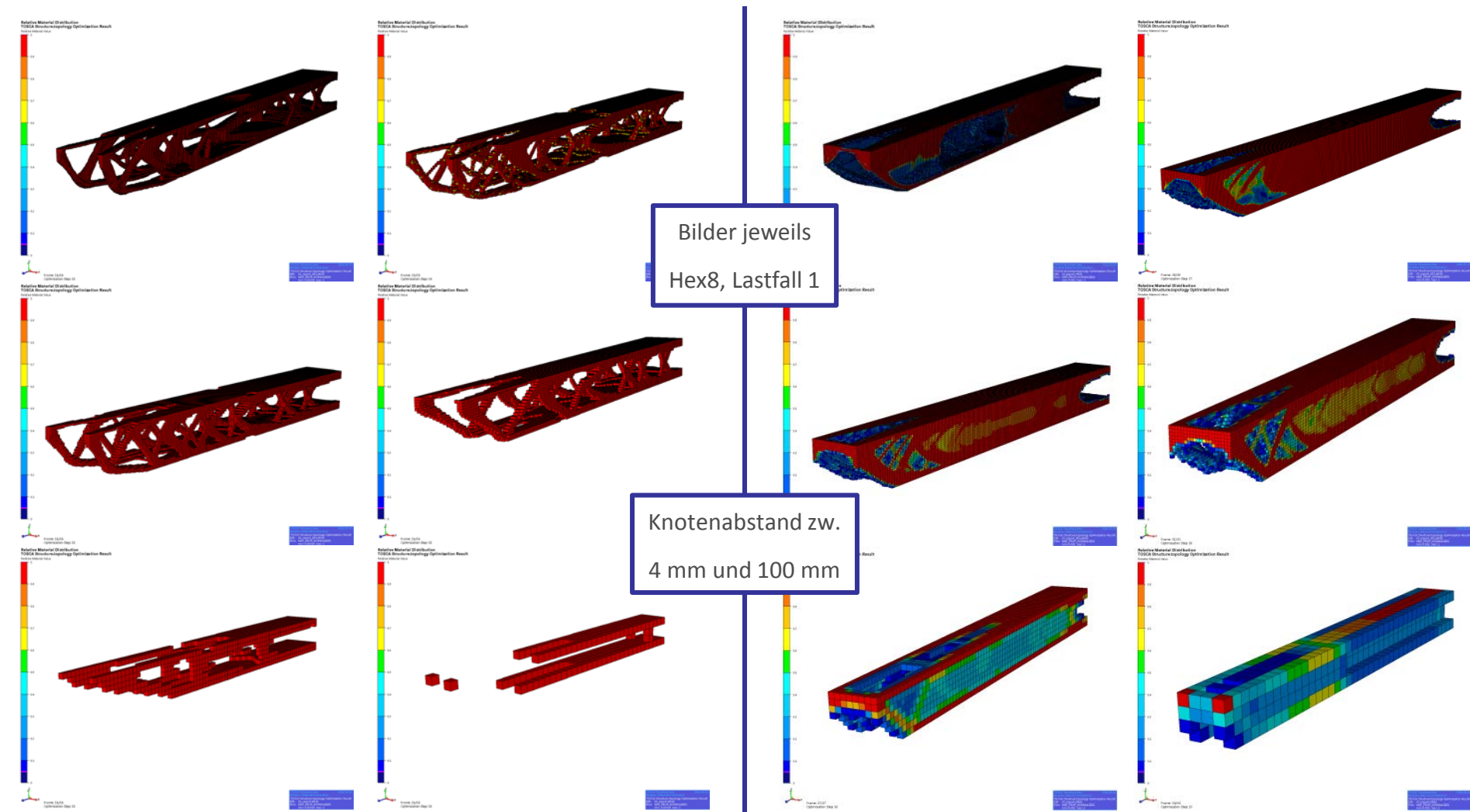
Lastfall 2



Lastfall 3

# Analyse der Parameterabhängigkeiten

## Finite-Elemente-Netz-Feinheit

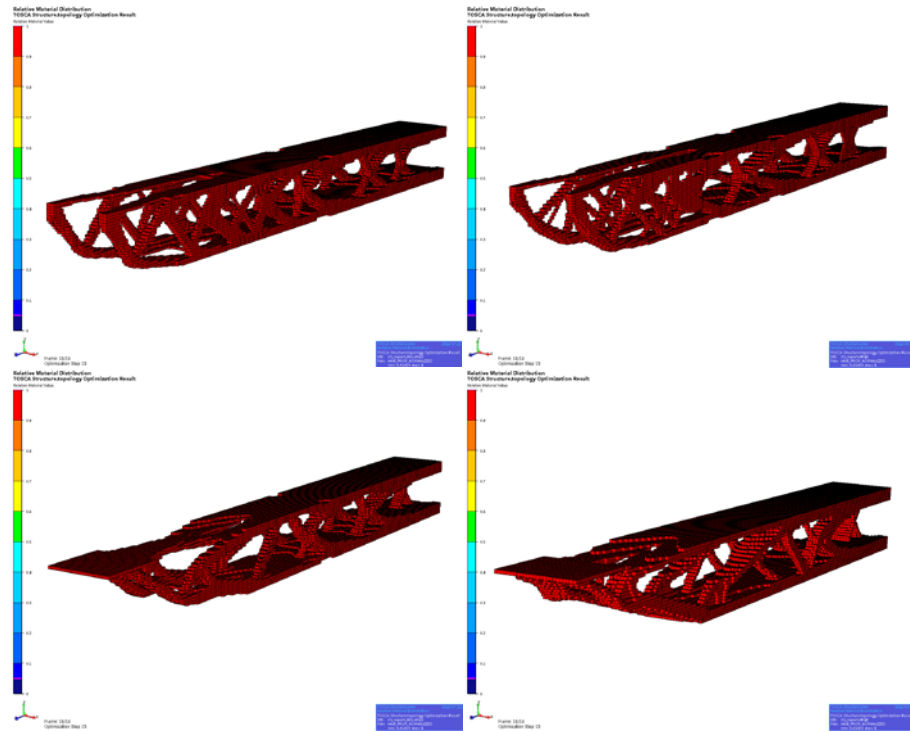


# Analyse der Parameterabhängigkeiten

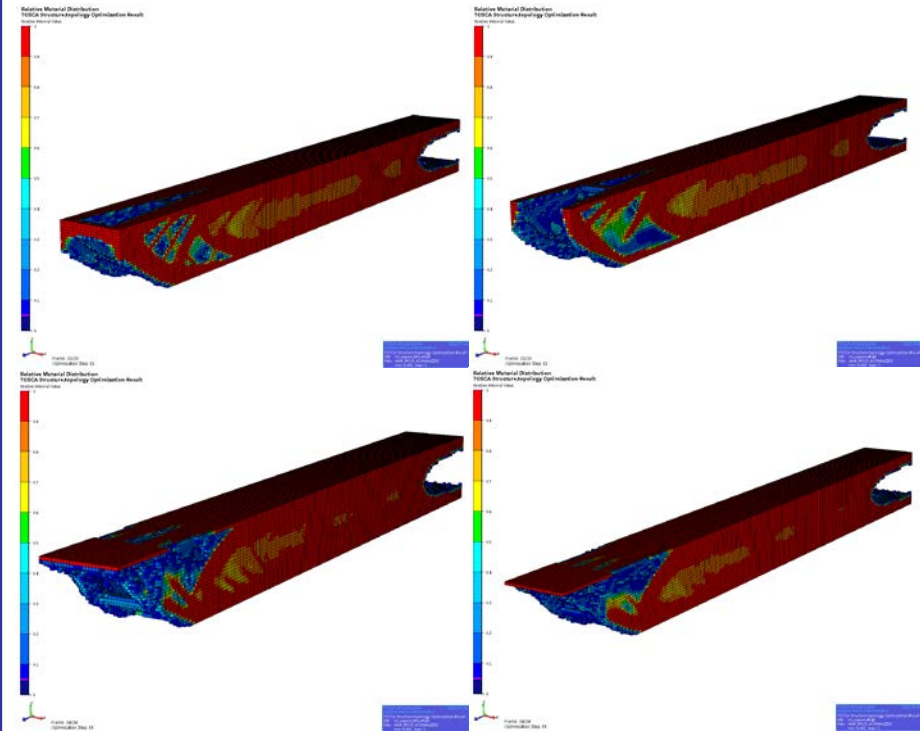
## Elementtyp



### Controller



### Sensitivity



Jeweils Hex8 (Spalte 1 und 3) und Hex20 (Spalte 2 und 4), unterschiedliche Netzfeinheiten

Es empfehlen sich für die beiden Algorithmen **lineare Hexaeder** bzw. **lineare Tetraeder**

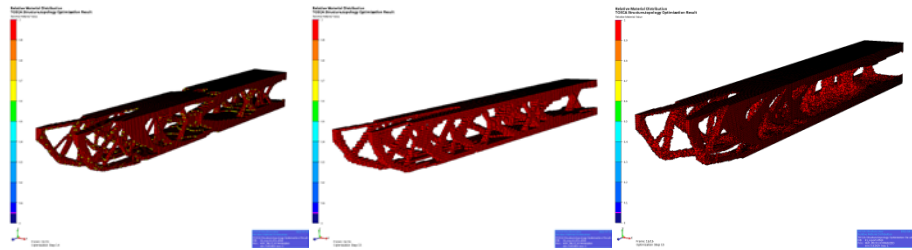
Quadratische Ansätze haben nur bei Drucklasten Vorteile, rechnen dafür länger

# Analyse der Parameterabhängigkeiten

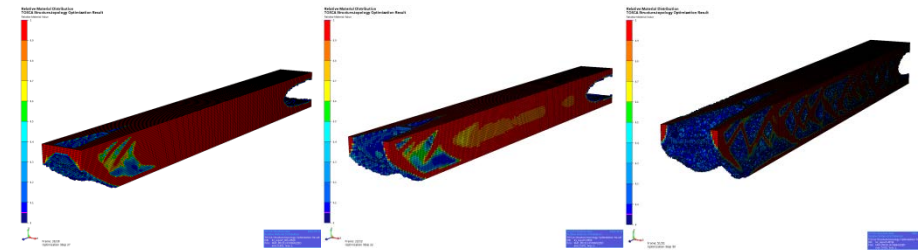
## Elementtyp bei gleicher Anzahl an Freiheitsgraden



### Controller

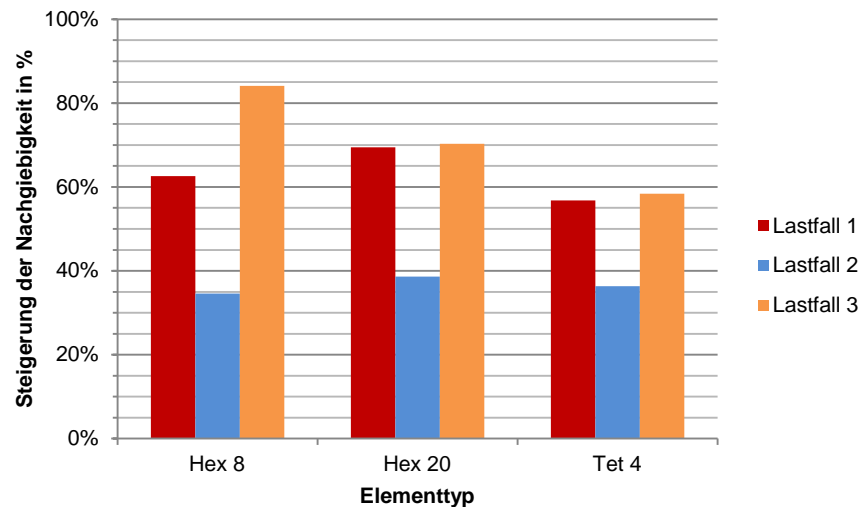


### Sensitivity

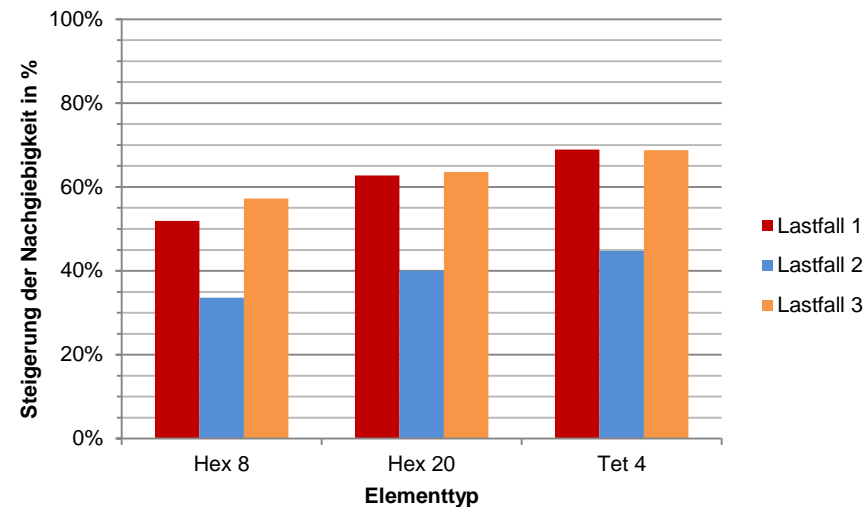


Bilder: jeweils Lastfall 01, fein vernetzt

### Controller-Algorithmus, fein vernetzt



### Sensitivity-Algorithmus, fein vernetzt



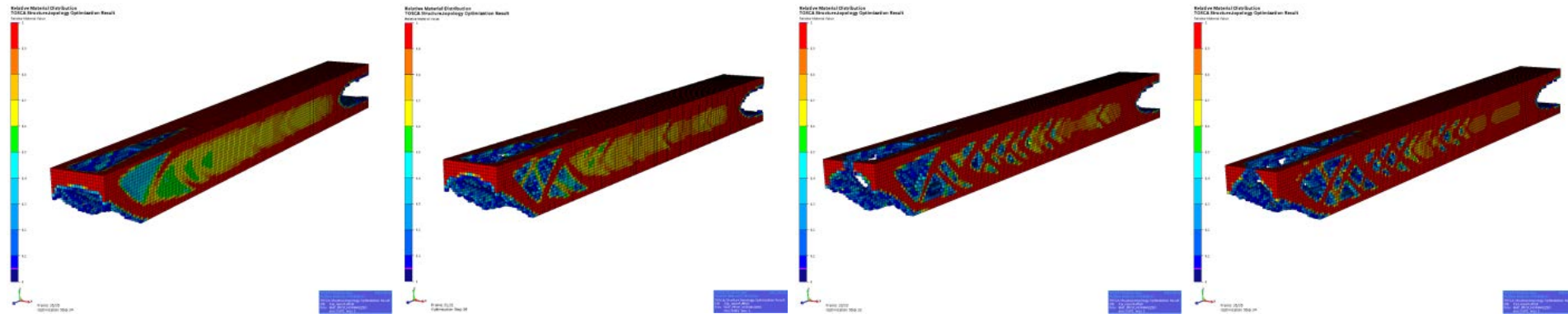
Bei gleichen Anzahl an Freiheitsgraden rechnen **Tet4-Elemente (Controller)** bzw. **Hex8-Elemente (Sensitivity)** am Besten und sind somit für diese Algorithmen vorzuziehen

# Analyse der Parameterabhängigkeiten

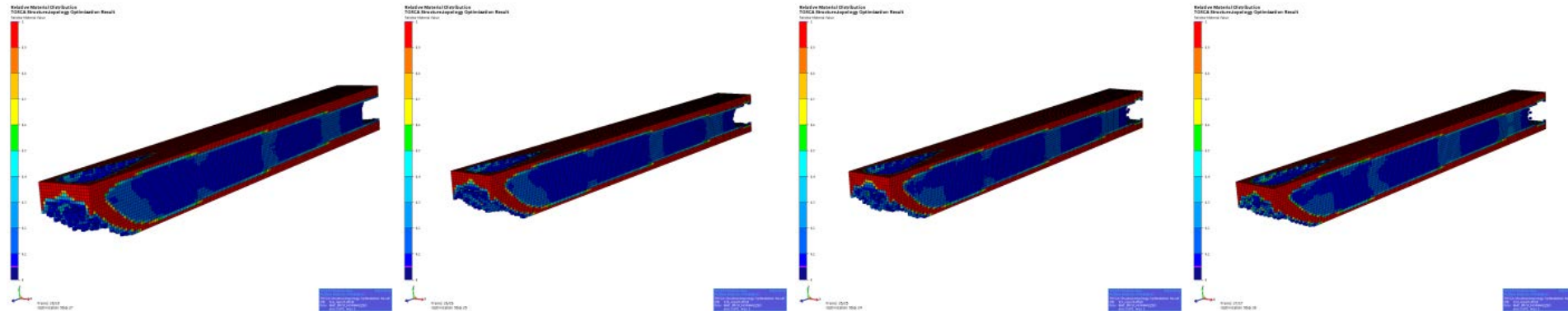
## Sensitivity-spezifische Parameter – Interpolation (1)



**SIMP** mit Penalty-Faktoren zwischen 2,0 und 5,0



**RAMP** mit Penalty-Faktoren zwischen 2,0 und 5,0



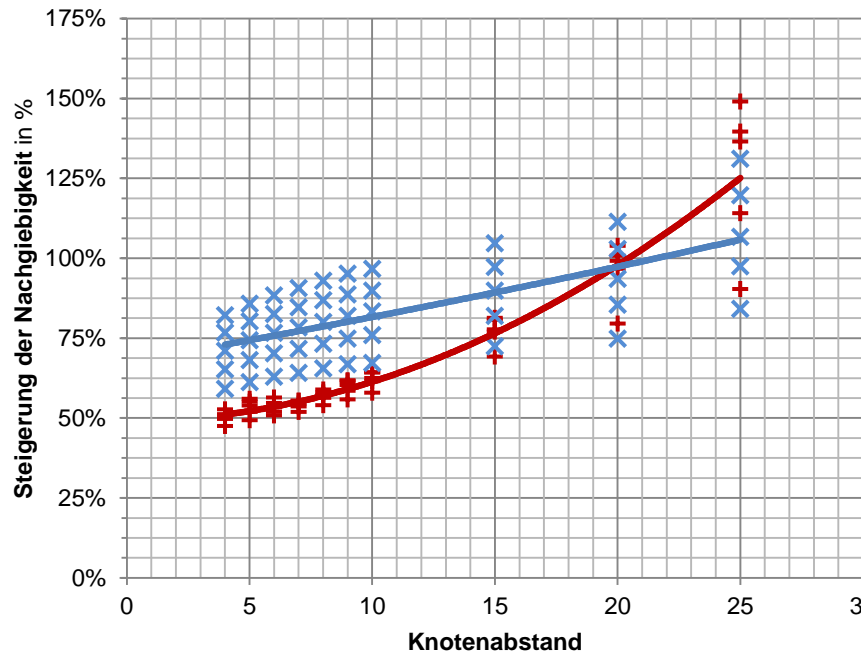
# Analyse der Parameterabhängigkeiten

## Sensitivity-spezifische Parameter – Interpolation (2)

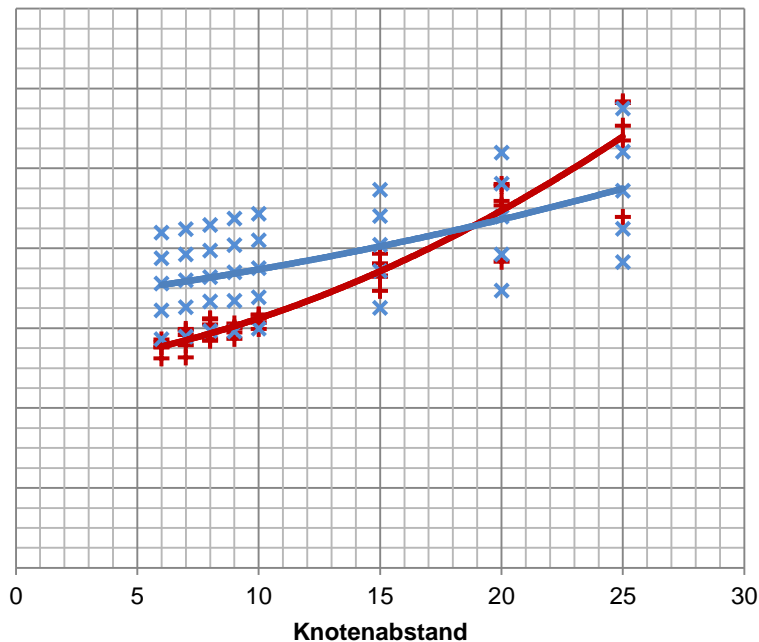


Vergleich von **SIMP** und **RAMP** mit Penalty-Faktoren zwischen 2,0 und 5,0  
jeweils für lineare Hexaeder und lineare Tetraeder

Hex8-Elemente, alle Penalty-Faktoren



Tet4-Elemente, alle Penalty-Faktoren



- + SIMP
- x RAMP
- SIMP-Trend
- RAMP-Trend



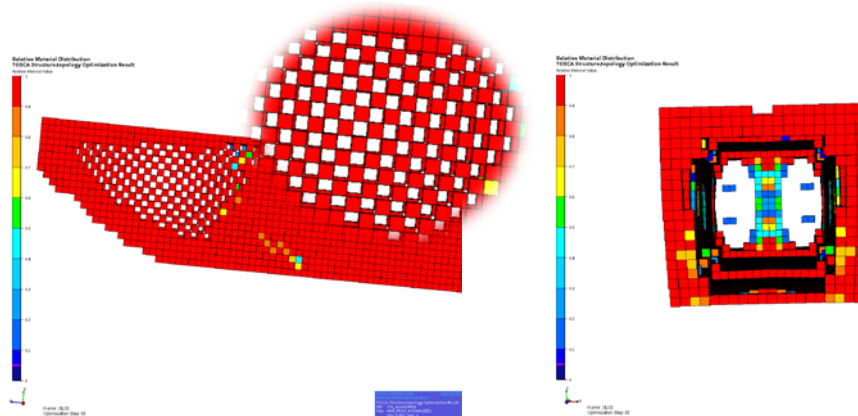
# Analyse der Parameterabhängigkeiten

## Sensitivity-spezifische Parameter – Filter-Radius/Density-Update

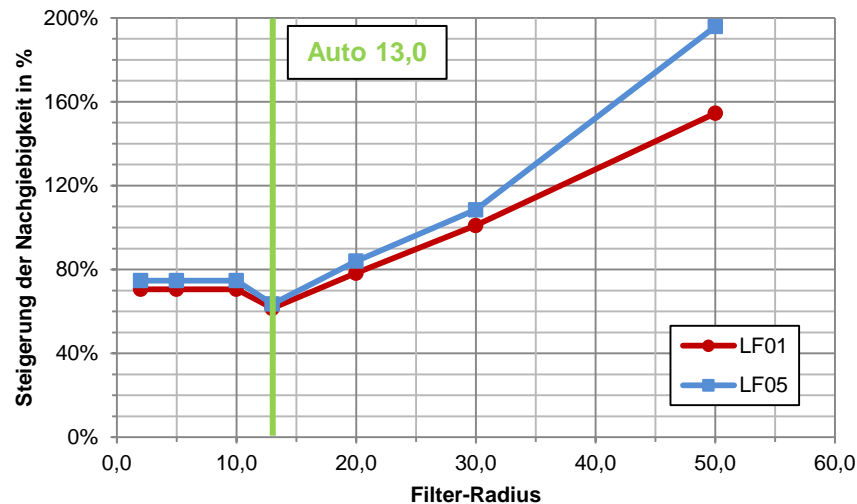


### Filter-Radius Probleme:

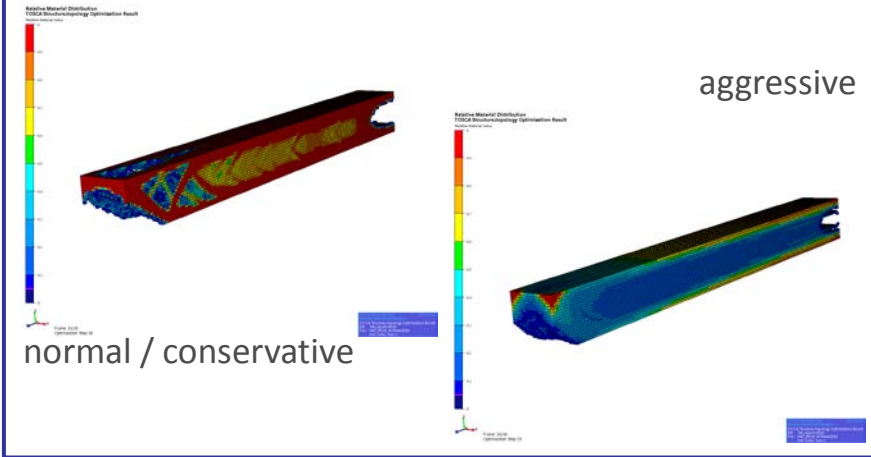
Hex8, Lastfall 1 mit Filter-Radius 2,0



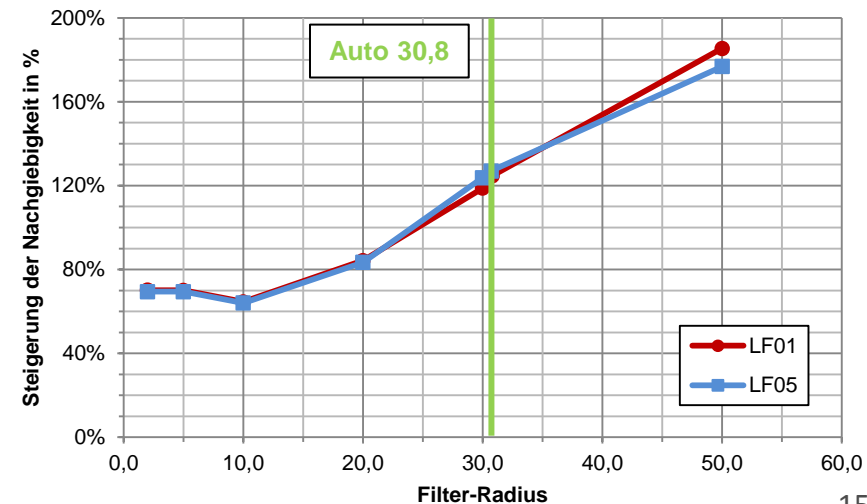
Filter-Radius, Hex8-Elemente



### Density-Update



Filter-Radius, Tet10-Elemente

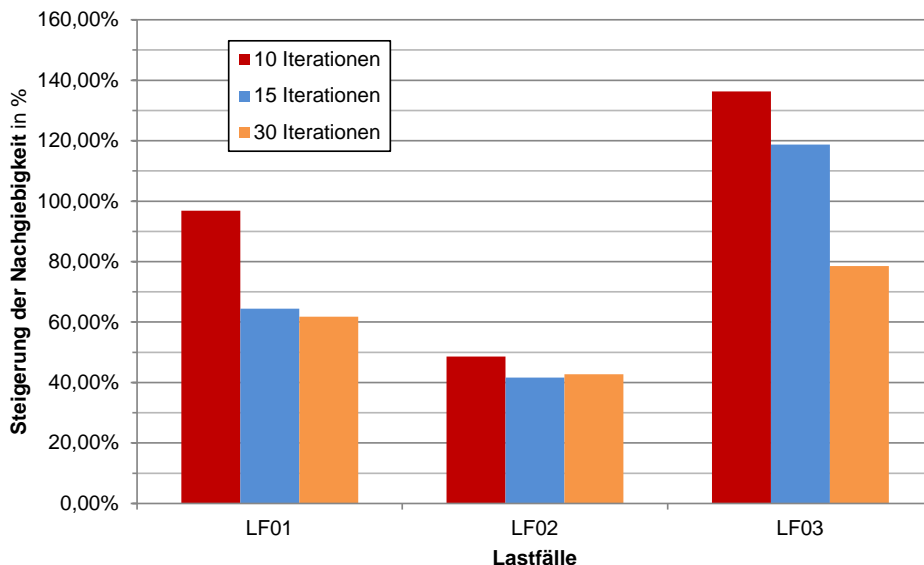




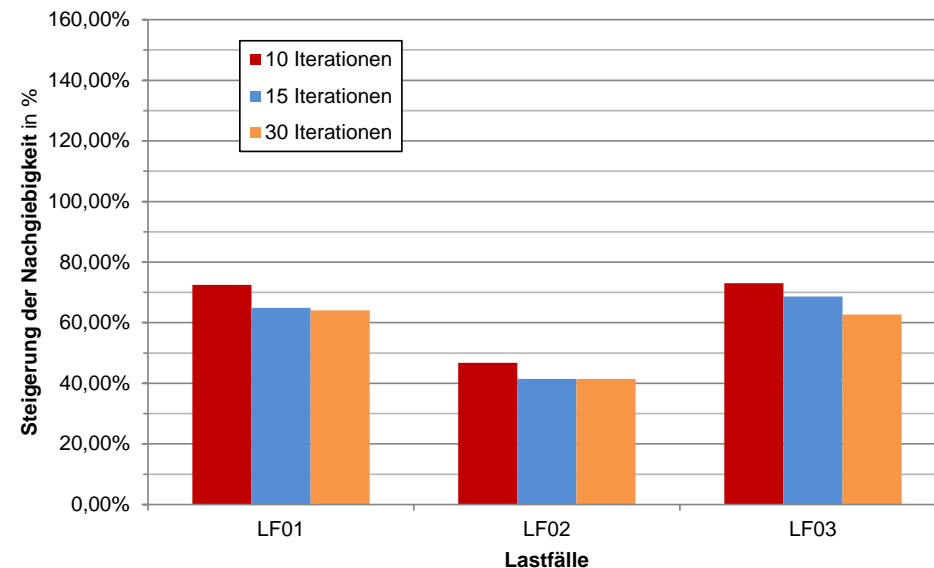
- Variation der Iterationsanzahl von 10 bis 30 Iterationen (Standard 15)
- Einstellung der Geschwindigkeit (VERY\_SLOW, SLOW, MODERATE, MEDIUM, FAST) legt Iterationszahl jeweils automatisch fest, verschlechtert aber Rechenzeit bzw. Nachgiebigkeit

→ 15 Iterationen erzielen optimales Nachgiebigkeits-/Rechenzeitverhältnis

Controller-Algorithmus, Hex8-Elemente



Controller-Algorithmus, Tet10-Elemente





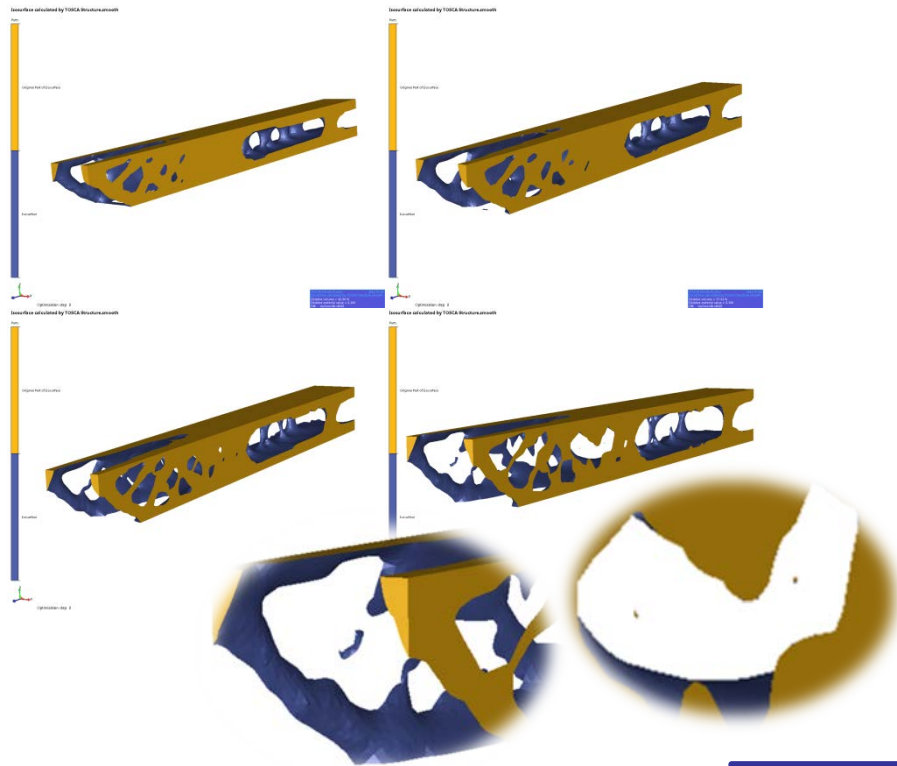


# Analyse der Parameterabhängigkeiten

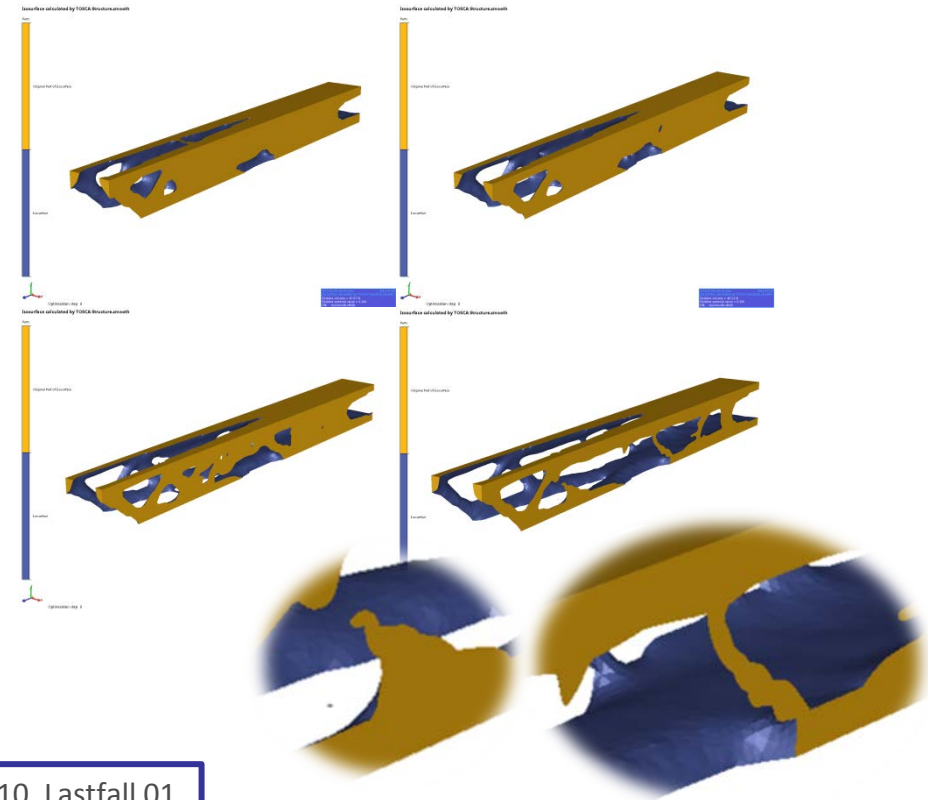
## Smooth / Glättung



### Controller



### Sensitivity



Bilder: Jeweils Tet10, Lastfall 01

Ausleitung in CAD-Systeme weder einfach möglich noch sinnvoll, da die **erzeugten Strukturen nicht fertigungsgerecht** sind und stellenweise frei schwebende Elemente beinhalten



- Viele verschiedene Parameter haben Einfluss auf das Optimierungsergebnis
- Wissen über die optimalen Einstellungen minimiert Fehlversuche und führt schnell zum optimalen Bauteil
- Direkte Integration der Optimierung in den Konstruktionsprozess ist schwierig, da die Ergebnisdaten nicht im CAD-System verwendbar sind → Ergebnis nur als Designvorschlag für Konstruktionsänderung/Neukonstruktion
- Fertigungsrandbedingungen sind ebenso wenig hilfreich und liefern keinen verwertbaren Designvorschlag
- Prozessrandbedingungen werden bisher nicht berücksichtigt

# Die Präsentation ist beendet

Haben Sie noch Fragen?



**Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!**

**Bitte stellen Sie nun Ihre Fragen...**

